

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE MADRID

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR



**Grado en Ingeniería de Tecnologías y Servicios de
Telecomunicación**

TRABAJO FIN DE GRADO

**Implementación y verificación de un sistema receptor de
comunicaciones basado en software definido por radio.**

**José María Navarro Magaldi
Tutor: Juan Córcoles Ortega**

Junio 2019

Implementación y verificación de un sistema receptor de comunicaciones basado en software definido por radio.

AUTOR: José María Navarro Magaldi

TUTOR: Juan Córcoles Ortega.



Grupo de Radiofrecuencias: Circuitos, Antenas y Sistemas (RFCAS)
Dpto. de Tecnología Electrónica y de las Comunicaciones
Escuela Politécnica Superior
Universidad Autónoma de Madrid
Junio de 2019

Resumen (castellano)

El aumento de la demanda de los pasajeros en el ámbito del sector aéreo ha propiciado la proliferación de aeropuertos y rutas aéreas, otorgando mayor flexibilidad al uso del espacio aéreo. Este desarrollo, sin embargo, no ha venido acompañado de unas medidas de seguridad deseables en un sector tan arriesgado, sobre todo en el ámbito de las telecomunicaciones.

Actualmente, las comunicaciones de los aviones permanecen codificadas, pero no encriptadas, con el evidente riesgo de que los parámetros críticos del avión sean abiertamente conocidos y utilizados por terceros. Este uso puede ser en su propio beneficio o bien en detrimento de la seguridad de los pasajeros. Piénsese, por ejemplo, en la posibilidad de conocer la matrícula del avión, su velocidad lineal o vertical o el código del transpondedor, lo que permitiría falsificar una comunicación con el avión, transmitiéndole información distinta.

El presente Trabajo tiene por objeto desarrollar una herramienta útil para demostrar la posibilidad de acceder a dichos datos. Para ello, se ha desarrollado un software que permite captar, procesar y decodificar información en tiempo real sobre aviones, así como los datos más relevantes que se radian a 1.090 MHz mediante el estándar de comunicación “[Automatic Dependent Surveillance-Broadcast](#)” o [Sistema de Vigilancia Dependiente Automática de aviación \(ADS-B\)](#).

El software consta de cuatro partes: (i) la captación de las señales, (ii) su procesamiento, (iii) el cálculo de los parámetros y (iv) la representación de estos.

1. La captación de las señales se realizará mediante el [decodificador de televisión digital Realtek R820T](#) haciendo uso de los módulos de [software definido por radio \(SDR\)](#) en Matlab.
2. El procesamiento se efectúa mediante estructuras de datos y matrices, archivándose en filas de 112 bits.
3. El cálculo de los parámetros nos permitirá conocer algunos datos; en concreto, la velocidad del avión, su posición y la matrícula, todo ello haciendo uso de las funciones, desarrolladas al efecto.
4. La representación de los datos se plasmará en último lugar para comprobar la corrección de los parámetros calculados.

En conclusión, hemos identificado que sería necesario fomentar métodos de cifrado que protejan la información de posibles usos inadecuados.

Abstract (English)

The increase demand of growth airlift escalates the capacity of airports and aerial routes, giving more flexibility to use the airspace, but even today these data are not encrypted being crucial for aircraft secure.

This progress leads to knowledge of the correct position of the aircraft, as well as knowledge of the registration, linear speed, vertical speed, the transponder code, being the code to establish communication with the control tower, being able to falsify a communication with the airplane, transmitting different information to it.

This Bachelor Thesis describes step by step the software development cycle of a consistent, detailed and implemented project which try to capture, process and decode information about planes. Similarly, this process will capture the most relevant data related to the frequency 1.090MHz through the standard method [\(ADS-B\) Automatic Dependent Surveillance-Broadcast](#).

This paper consists on four major parts: signal caption, signal processing, parameters calculation and data representation:

1. Signal capture will be done by integrating [digital Relatek R820T T.V. decoder](#) and using [software define radio \(SDR\)](#) Matlab modules.
2. Signal processing is done through data structure and matrices normally captured by a row of 112 bits in order to organize the information received.
3. The parameters calculation allows us to know some data, the speed, position and registration all use it by the next Matlab functions
4. Data representation will be recorded to check it correctly with the automatic software and hand calculation as well.

Keywords (ingles)

SDR, ADS-B, Mixer, broadcast, contract, Type Code, Extended Message.

Agradecimientos:

A todo el Claustro de Profesores de la Escuela Politécnica Superior. Gracias por brindarme unos conocimientos que no sólo me han guiado en la realización de este proyecto, sino que además han marcado mi trayectoria académica. Guardaré un recuerdo imborrable de todos vosotros.

Un agradecimiento especial a:

- Dr. **Juan Córcoles Ortega**. Gracias por haber seguido mi proyecto desde el principio sin haber sido alumno tuyo. Gracias por apoyar mis ideas e ilusiones y por aventurarte conmigo en este Trabajo Fin de Grado. Tu ayuda ha sido esencial para mí a la hora de aplicar la teoría a una situación real en un perímetro más amplio al que inicialmente se requería.
- Dr. **Jorge Alfonso Ruiz Cruz**. Gracias por tu forma de explicar y por hacer comprensible y fácil la radiofrecuencia, los circuitos, los sistemas, las antenas. Tus explicaciones en Aula y la conexión permanente entre teoría y telecomunicación práctica actual enriquecen la Escuela.
- Dr. **Jose Luis Masa Campos**. Nunca olvidaré la experiencia de crear antenas desde cero. Gracias por todo tu apoyo en mi experiencia académica internacional.
- Dr. **Fernando Maestre Miranda**: Gracias por prepararme para la vida real. Gracias por abrir mi mente a toda oportunidad, sea de telecomunicación o no.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1	Introducción.....	1
1.1	Motivación.....	1
1.2	Objetivos.....	2
1.3	Organización de la memoria.....	2
2	Estado del arte	5
2.1	Software Definido por Radio (SDR)	5
2.1.1	Introducción.....	5
2.1.2	Definición del Software Definido por Radio (SDR)	5
2.1.3	Versiones del SDR	6
2.1.4	Arquitectura SDR	8
2.1.5	Componentes del SDR	9
2.2	ADS-B	10
2.2.1	Concepto.....	10
2.2.2	Modos de comunicación.....	11
2.2.2.1	El Modo A	11
2.2.2.2	El Modo S.....	12
2.2.2.3	Bloques de datos	13
2.2.2.4	Formato de los pulsos en ADS-B	13
2.2.2.5	Espacio entre pulsos	14
2.2.2.6	Formato ADS-B.....	14
3	Pruebas y resultados	18
3.1	Previo análisis sobre la configuración y diseño del software desarrollado	18
3.2	Decodificación de los datos recibidos paso a paso.....	19
3.3	Demostración sobre la ejecución en Matlab y comprobación sobre el software externo.....	28
4	Conclusiones y trabajo futuro.....	33
4.1	Conclusiones.....	33
4.2	Trabajo futuro	33
	Referencias	35
	Glosario	37
	Anexos.....	I
A	Configuración del SDR con Matlab	I
B	Configuración del software externo:	IV
C	Definiciones	- 1 -

INDICE DE FIGURAS

FIGURA 1: DIAGRAMA DE BLOQUES DE UN SDR.....	6
FIGURA 2: DIAGRAMA DE BLOQUES DE LA RADIO DIGITAL VERSIÓN 1.	7
FIGURA 3: DIAGRAMA DE BLOQUES RADIO DIGITAL VERSIÓN 2.	7
FIGURA 4: DIAGRAMA DE BLOQUES RADIO DIGITAL VERSIÓN 3.	8
FIGURA 5: DIAGRAMA DE BLOQUES DE NUESTRO SDR.	9
FIGURA 6: RTL-SDR R820T.....	9
FIGURA 7: MODO A.	11
FIGURA 8: SINCRONIZACIÓN DE LAS RESPUESTAS EN MODO A. [5,PAG.1]	12
FIGURA 9: FORMATO DEL ENVIÓ DE DATOS. [24].....	13
FIGURA 10: CABECERA 112 BITS. [23,PAG.4]	14
FIGURA 11: INICIALIZACIÓN DE PARÁMETROS DEL SDR-RTL.	18
FIGURA 12: CAMPO EN DATOS. [23,PAG.7]	19
FIGURA 13: ARRAY DE COMPROBACIÓN DE LA DECODIFICACIÓN. [23,PAG.7]	20
FIGURA 14: CONVERSIÓN DECIMAL A CARÁCTER. [23,PAG.7]	20
FIGURA 15 : INFORMACIÓN DE LA TRAZA DE DATOS DE ALTITUD BAROMÉTRICA. [23,PAG.10].....	21
FIGURA 16: ZONAS PARES E IMPARES.[4,PAG:1,FIG:DLAT2.PNG]	23
FIGURA 17: CONSTANTES GEOGRÁFICAS. [23,PAG.12,FIG:1.4].....	23
FIGURA 18: COMPROBACIÓN DE LATITUDES. [23,PAG.13,FIG:1.6].....	24
FIGURA 19: FUNCIÓN NÚMERO DE ZONAS DE LONGITUD. [23,PAG.10,FIG:1.2].....	24
FIGURA 20: ECUACIONES SOBRE LONGITUD.[23,PAG.13,FIG:1.8]	24
FIGURA 21: FÓRMULA DE CONFIGURACIÓN DE LA LONGITUD.[23,PAG.14,FIG:1.10].....	24
FIGURA 22: POSICIÓN FINAL DEL AVIÓN PARA TRAZA DE DATOS. [HTTPS://WWW.COORDENADAS-GPS.COM/]	25
FIGURA 23: CONTENIDO DE LOS DATOS DE LA VELOCIDAD. [23,PAG.11].....	26
FIGURA 24: MATRÍCULA DEL AVIÓN IBE0423.	28

FIGURA 25: DATOS DEL IBE0423.	28
FIGURA 26: POSICIÓN IBE0423 A LAS 10:09AM EL 1 DE MAYO 2019. [HTTPS://WWW.COORDENADAS-GPS.COM/].....	29
FIGURA 27: INFORMACIÓN DECODIFICADA AUTOMÁTICAMENTE.	29
FIGURA 28: VELOCIDAD IBE0423.....	29
FIGURA 29: COMPROBACIÓN DE LA EXISTENCIA DEL AVIÓN.....	30
FIGURA 30: IDENTIFICACIÓN TRA98W.....	30
FIGURA 31: DATOS DEL TRA98W.....	30
FIGURA 32: VELOCIDAD DEL TRA98W.....	30
FIGURA 33: POSICIÓN DEL AVIÓN POR LATITUD Y LONGITUD.[WWW.COORDENADAS-GPS.COM/] ..	31
FIGURA 34: AVIÓN DETECTADO POR EL SOFTWARE EXTERNO.....	31
FIGURA 35: INFORMACIÓN COMPARADA POR ADS-B ONLINE.[WWW.RADARBOX24.COM]	31
FIGURA 36: PANEL DE ADD-ONS.	I
FIGURA 37: ADD-ONS MANAGE.....	I
FIGURA 38: “SETUP” DEL SDR EN MATLAB.	II
FIGURA 39: INSTALACIÓN DE LOS DRIVERS CON ZADIG.	II
FIGURA 40: FINAL DE LA CONFIGURACIÓN DEL SDR EN MATLAB.....	III
FIGURA 41: VERIFICACIÓN DE CONFIGURACIÓN Y PARÁMETROS BÁSICOS.	III
FIGURA 42: INSTALACIÓN RTL1090.....	IV
FIGURA 43: CONFIGURACIÓN DEL SOFTWARE AUTOMATIZACIÓN ADSCOPE.	V
FIGURA 44: DEMO ADSBSCOPE.....	VI
FIGURA 45: PANEL GENERAL RADARBox24.COM.....	VI

INDICE DE TABLAS

TABLA 1: ESTRUCTURA DE MENSAJE ADS-B. [23,PAG.4]	14
TABLA 2: CÓDIGOS CA.[25].....	15
TABLA 3: TIPOS DE CÓDIGO.[23,PAG.6]	15
TABLA 4: CONVERSIÓN DE DATOS RECIBIDOS.	20
TABLA 5: CONVERSIÓN DE LA MATRÍCULA DEL AVIÓN.	21
TABLA 6: DATOS DE POSICIÓN.	22
TABLA 7: PAYLOAD EN BINARIO.	22
TABLA 8: DATOS RECIBIDOS PARA DECODIFICAR Y CALCULAR LA VELOCIDAD.	26

1 Introducción

Las aeronaves civiles utilizan un sistema de comunicación -a través de señales- que permite el intercambio de información entre ellas y con los terminales aeroportuarios. La información que intercambian va desde la posición, la velocidad, la altitud o el itinerario hasta la compañía a la que pertenecen o la matrícula.

El presente proyecto consiste en la creación de un sistema de decodificación de señales que:

- las detecta a través de un [Software Definido por Radio \(SDR RTL R820T\)](#),
- las ordena a través de matrices (con filas de 112 bits),
- las comprueba y asigna a la aeronave que corresponda en el caso de distintas aeronaves, y
- las decodifica determinando el contenido de la información emitida (en concreto, es capaz de identificar la velocidad, la posición, la altitud, la matrícula del avión, el tipo de avión y la compañía a la que pertenece).

1.1 Motivación

La motivación para realizar este proyecto no es única y engloba varios elementos:

- En primer lugar, me ha posibilitado crear un sistema de telecomunicación con aplicación práctica, útil y a un costo muy reducido.
- En segundo lugar, me ha permitido aplicar los conceptos aprendidos en la carrera en relación con la captación, el procesamiento, cálculo y representación de señales. En este caso concreto de aviones civiles.
- En tercer lugar, se trata de un proyecto que tiene la posibilidad de ser desarrollado más prolongadamente. Una información tan sensible como la comunicada en estas señales debería ser encriptada para evitar posibles accidentes por interferencias o incluso ataques terroristas.

1.2 Objetivos

El objetivo técnico que he perseguido en este proyecto es:

1. Profundizar en el estudio de las tecnologías aplicables al caso que nos ocupa; en concreto, la tecnología ADS-B y SDR.
2. Analizar cómo aplicar las mismas en la construcción de un sistema práctico.

1.3 Organización de la memoria

La memoria consta de los siguientes capítulos:

- **Capítulo 1: Introducción**

En este primer capítulo se describen brevemente las tecnologías ADS-B y SDR y se enumeran los objetivos marcados para el desarrollo de este TFG. Además, se detalla la estructura de la memoria y sus capítulos, esbozando el contenidos de cada uno de ellos.

- **Capítulo 2: Estado del arte**

En este segundo capítulo, se describe detalladamente el Software Definido por Radio y la tecnología ADS-B.

- ❖ Respecto al SDR, además de una breve introducción, se profundiza en sus versiones, arquitectura y componentes.
- ❖ En el caso del ADS-B, se incluye la definición y se detalla el funcionamiento del sistema, su formato y sus modulaciones.

- **Capítulo 3: Diseño y desarrollo**

En este punto, se describe a través de un ejemplo de captación real (de las 20 captaciones obtenidas) cómo funciona el sistema diseñado. En concreto, la captación se realizó:

- ❖ En Fecha: 1 de Mayo de 2019 a las 10:09
- ❖ Coordenadas: latitud: 40.461289, longitud:-3.687886
- ❖ Aeronave con matrícula: IBE0423
- ❖ Compañía: Iberia.
- ❖ Itinerario: Bilbao (9:22)- Madrid (10:18).
- ❖ Velocidad: 153,99466 km/h y descendiendo: 0,3251 metros/segundo.
- ❖ Altitud: 3.100 pies : 944,88 metros.

- ❖ Posición de la aeronave en el momento de la Captación: Torres de la Alameda, latitud: 40.4263 y longitud:-3.411438

Seguidamente a la captación se realizó la verificación de datos, su clasificación y decodificación. En el presente capítulo se detalla el procedimiento paso a paso.

- **Capítulo 4: Conclusiones y trabajo de futuro.**

Para terminar la memoria, se adjuntan una serie de reflexiones sobre el trabajo llevado a cabo y se plantean soluciones de utilidad

2 Estado del arte

Este capítulo pretende introducir detalladamente la tecnología SDR y ADS-B. Inicialmente tratará sobre la definición, los avances, la arquitectura y los componentes de dicha tecnología. Por otro lado, finaliza el capítulo definiendo y detallando el sistema ADS-B.

2.1 Software Definido por Radio (SDR)

2.1.1 Introducción

La tecnología definida por radio fue acuñada en 1984 por la empresa “E-Systems Inc” (división Garland-Texas). Esta tecnología, que nace para aplicaciones muy técnicas o científicas, encontró una importante aplicación práctica en la producción de decodificadores de televisión digital. La primera empresa que desarrolló esta utilidad fue la sociedad Realtek (Taiwan).

Posteriormente, utilizando una [antena de monopolo](#) se encontró un mayor ámbito de aplicación a dicha tecnología. A través de esta antena y reduciendo el ancho de canal del sintonizador original (de 8 MHz a 3,2 / 2,4 MHz) se conseguía analizar con mayor detalle el contenido de los canales y por consiguiente sintonizar muchas más frecuencias.

Gracias a esta combinación (antena + SDR) se conseguía captar y analizar franjas mucho más amplias que van desde 60 Hz hasta 1.75GHz, algo hasta entonces inimaginable.

2.1.2 Definición del Software Definido por Radio (SDR)

El Software Definido por Radio ha permitido que el sistema de radiocomunicaciones que antes dependía de distintos dispositivos (muy grandes, complejos y costosos como: [Moduladores/Demoduladores](#), [Filtros](#), [Amplificadores](#), [Acopladores](#) [Direccionales](#), [Rectificadores](#), [Repetidores](#), [Conmutadores](#)...etc.) se unifique en un solo elemento (chip conectado a ordenador). El sistema, pues, se convierte en más dependiente del software que del hardware y, por lo tanto, se simplifica el proceso, ofreciendo la posibilidad de evolucionar más fácilmente.

a) El funcionamiento del SDR en emisión

- Permite la selección de la señal digital que se desea emitir.
- Convierte ésta en señal analógica a través de un [conversor digital-analógico](#).
- Recibe la información, la [modula](#) para su transmisión y la alza a la frecuencia necesaria (adecuándola a la normativa del espectro de frecuencia electromagnético)

b) El funcionamiento del SDR en la recepción

- Selecciona la frecuencia en la que se reciben las ondas [moduladas](#).
- Procesa y convierte las ondas de analógicas a digitales a través de [muestreo](#) y [conversión analógico – digital](#) de [banda ancha](#).

En la Figura 1, se muestra el diagrama de bloques genérico de un sistema de SDR:

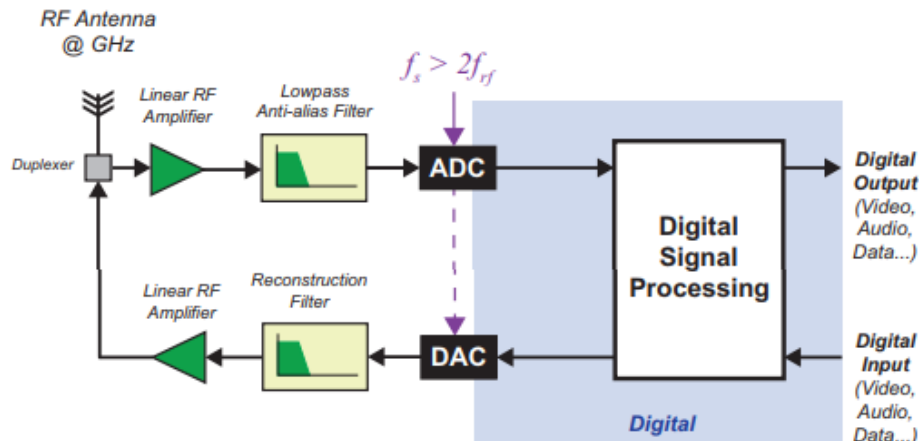


Figura 1: Diagrama de bloques de un SDR [\[2,Pag 8, Fig. 1.6\]](#)

En la parte superior de la Figura 1 se detalla el caso de una señal analógica. Ésta es capturada por una antena de radiofrecuencia ([monopolo](#)), transita por un [duplexor](#), se amplifica, se filtra¹ (cumpliendo el [teorema de Nyquist – Shannon](#)) y se convierte en digital (ya sea en formato video, audio o texto).

En la parte inferior de la imagen se muestra este mismo proceso teniendo como entrada una señal digital y como salida una señal analógica. En este caso, se utiliza la [conversión digital-analógica](#), el [filtro](#) de reconstrucción, la [amplificación](#) de la señal, el tránsito por un [duplexor](#) y el envío.

2.1.3 Versiones del SDR

La primera generación de radios digitales (figura 2) surgió a mediados de la década de 1990. Éstas captaban las señales a través de antena y las procesaban analógicamente: Un [oscilador local](#) las pasaba de [radiofrecuencia](#) a [frecuencia intermedia](#). Posteriormente, tras pasar por dos [filtros](#), un [amplificador](#) y un segundo oscilador las transformaba de ondas de frecuencia intermedia a ondas de [banda base](#). En banda base se [muestran](#) las ondas, a un ritmo de decenas de KHz, en su proceso de digitalización. Finalmente, se utilizaba un [procesador digital de señales \(DSP\)](#) para recuperar adecuadamente las señales (emitidas/recibidas).

¹ [Antialiasing](#).

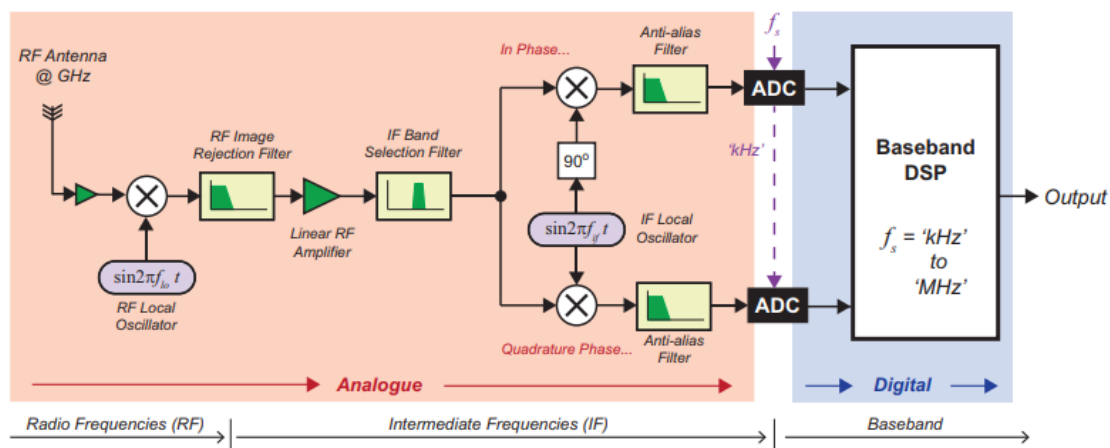


Figura 2: Diagrama de Bloques de la radio digital versión 1. [2,Pag:11,Fig:1.7 a]

La segunda generación de radios digitales (figura 3) fue en la década de los años 2000. En este periodo se mantiene el mismo esquema que el de la figura 2, con dos novedades: por un lado, se incrementa el ritmo de muestreo (de 10s KHz a 100s MHz); por otro, se simplifica el proceso del segundo oscilador (que pasa de frecuencia intermedia a banda base) incorporándose éste, en la parte digital.

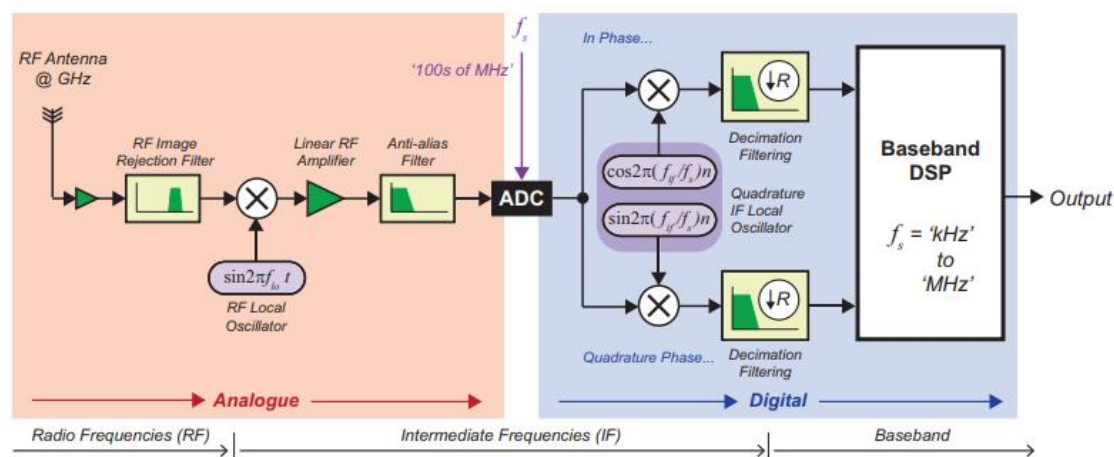


Figura 3: Diagrama de bloques radio digital versión 2.[2,Pag:11,Fig:1.7 b]

La siguiente generación (figura 4) permite un muestreo a ritmo de GHz manteniendo la arquitectura precedente.

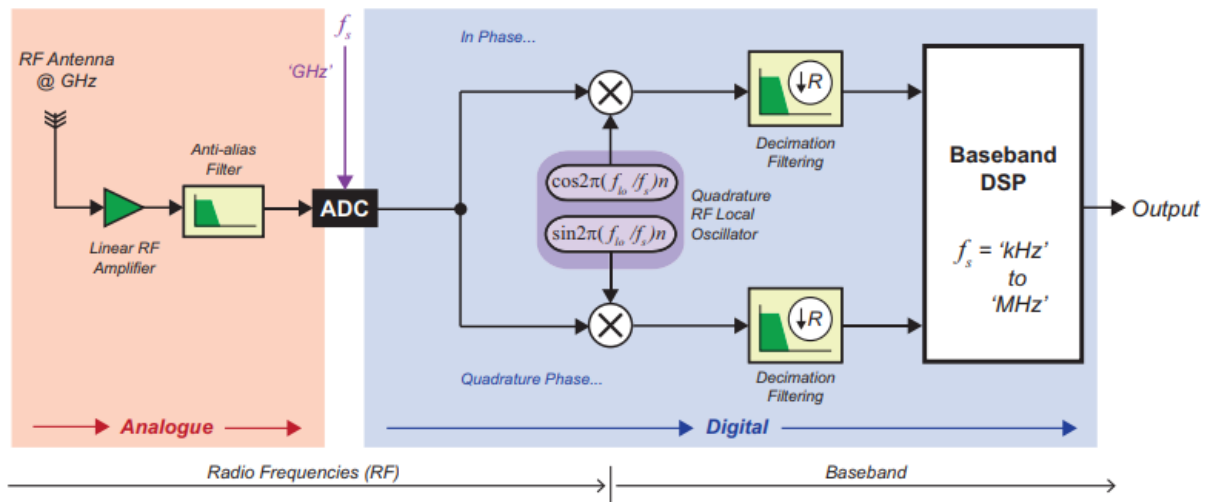
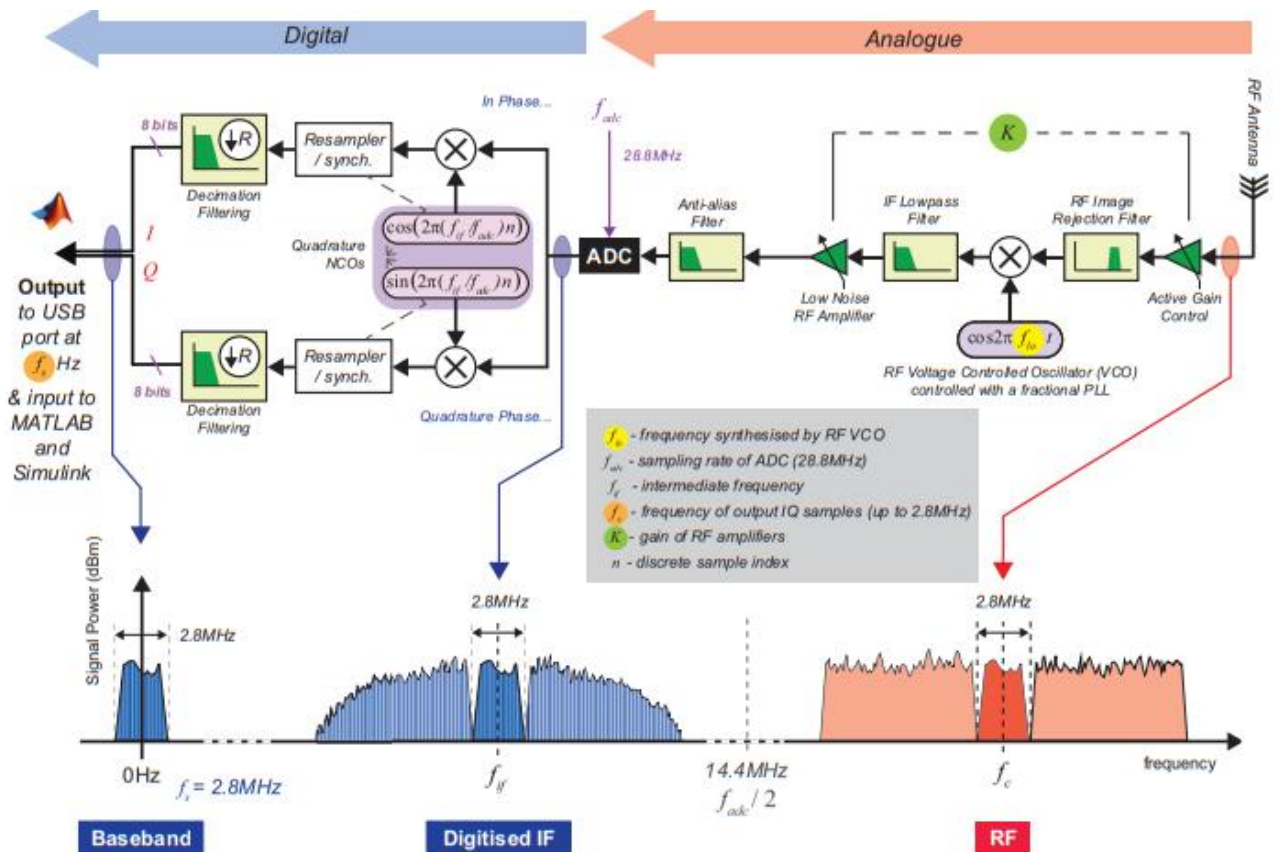


Figura 4: Diagrama de bloques radio digital versión 3. [2,Pag:11 ,Fig:1.7 c]

2.1.4 Arquitectura SDR

A continuación, se procede a detallar el funcionamiento de la arquitectura del RTL-SDR R820T (figura 5).

1. **Identificación de Señal y filtrado.** Para una identificación clara del contenido informativo de las señales, éstas pasan de la antena receptora a un [amplificador](#). El amplificador incrementa su potencia para que a través de un [filtro](#) se pueda separar el contenido informativo respecto al ruido superfluo.
2. **Conversión de Señales.** Tras el proceso de filtrado, las señales pasan por un [oscilador controlado por voltaje](#) que transforma su frecuencia de [radiofrecuencia](#) a [frecuencia intermedia](#).
3. **Control de Solapamiento.** Las señales pasan por un filtro [antialiasing](#) que evita pérdidas de información a causa de la superposición de señales.
4. **Digitalización de Señales.** La información, limpia de potenciales errores tras los sucesivos [filtros](#), se convierte a señal digital a través del citado [convertor](#).
5. **Procesado Digital.** La información, ya [digitalizada](#), se pasa a [banda base](#) que es la frecuencia original de la señal, consiguiendo una aproximación muy cercana a la señal original del emisor.



2.1.5 Componentes del SDR

En este punto, procedemos a enumerar y definir los componentes hardware del SDR RTL R820T (figura 6) a excepción de la entrada de MCX que en nuestro caso es coaxial.

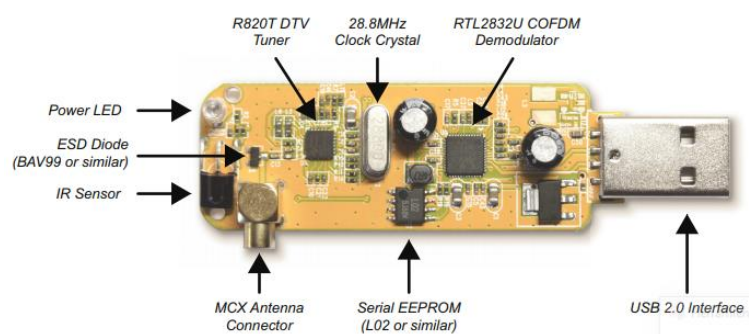


Figura 6: RTL-SDR R820T [3.Pag:16 Fig:1.9]

- **ESD Diodo (BAV99).** Un diodo a nivel general es un “interruptor o [conmutador](#)” que permite o deniega la circulación de la corriente eléctrica en un solo sentido. En concreto, el Diodo ESD BAV99 actúa como un conmutador para las señales, favoreciendo su desviación veloz y protegiendo el dispositivo de descargas electrostáticas.

- **IR Sensor.** Se trata de un receptor miniaturizado para sistemas de control remoto. Permite la captura de la franja del espectro radioeléctrico solo por lo que se refiere al infrarrojo (mandos a distancia...) y tiene algunas limitaciones ya que en nuestro caso se trata de frecuencias altas.
- **R820T DTV Tunner.** Es un [sintonizador](#) digital de baja potencia que procesa desde los 60 Hz hasta 1.75 GHz aproximadamente. [\[25\]](#)
- **28.8MHz Clock Crystal.** La precisión y estabilidad del dispositivo puede verse impactada por la temperatura que alcance el mismo. El reloj de cristal es un [oscilador de voltaje](#) que regula a través de tensiones de corrección la misma, evitando el sobrecalentamiento y potenciales incidentes. [\[24\]](#)
- **RTL-2832-U COFDM.** Este componente es el “cerebro” del dispositivo y actúa como [demodulador](#). Permite a través de la [multiplexación ortogonal codificada por división de frecuencia \(COFDM\)](#) que pueda haber múltiples destinatarios en la misma frecuencia sin interferir en sus propios mensajes. Este es en concreto uno de los métodos de comunicación actuales más utilizados en comunicaciones inalámbricas.
- **EEPROM serie.** Es una memoria ROM, es decir, solo lectura, en donde se almacena normalmente el firmware y consta de un almacenamiento pequeño.
- **Conector Coaxial.** Este componente permite la entrada de las señales captadas por la antena y su transmisión a través del dieléctrico.
- **Conector USB 2.0.** Se trata de un conector universal de bus de datos, estandarizado y de alta velocidad (2.0) con una tasa practica de transferencia de 280 Mbit/s (35MB/s), por el cual se trasmite la información a través un cable de par trenzado (esto es, con dos conductores aislados y entrelazados para anular interferencias de fuentes externas y entre cables mediante diafonía).

2.2 ADS-B

2.2.1 Concepto

El Sistema de Vigilancia Dependiente Automático en Difusión (ADS-B) es el utilizado para la vigilancia aérea y a través de este, los aviones transmiten datos sobre su posicionamiento y navegación. En particular, este sistema nos permite conocer la identificación del avión, su posición, altitud, velocidad, estado, así como la información del vuelo y del funcionamiento de la aeronave.

El ADS-B se caracteriza por dos notas fundamentales: (i) la dependencia de la información producida por la aeronave respecto a los sistema de abordó y del equipo en cabina, y (ii) la emisión automática de los datos a la torre de control sin participación del piloto.

El presente sistema necesita, por un lado, un programa de navegación situado en la cabina del avión y, por otro lado, una estación receptora de la información ADS para que pueda ser empleada por los sistemas de tratamiento.

El ADS se divide en dos grupos de técnicas, a saber: ADS-B en “broadcast” y ADS-C “contract”. Haciendo abstracción de este último, cuyo análisis desborda el objeto del presente trabajo, nos centraremos en el primer sistema, consistente en la radiodifusión de tramas de datos. Dicho sistema se caracteriza por el envío periódico de los datos previamente obtenidos por la cabina del avión, así como por la comunicación dual de la información, ya sea entre aeronaves o bien entre el avión y la terminal aeroportuaria.

2.2.2 Modos de comunicación

En la actualidad, el sistema ADS-B admite dos modalidades de comunicación: el Modo A y el Modo S.

2.2.2.1 El Modo A

Este Modo permite que la torre de control interroge a la aeronave a 1030 MHz y que ésta genere una respuesta automática con su código transpondedor. Por ejemplo, si en una interrogación la aeronave transmite el código transpondedor 7700, el mensaje convencional que está trasmitiendo a 1090 MHz es de emergencia.



Figura 7: Modo A. [\[5,Pag.1,Fig: Mode A\]](#)

En la figura 7 pueden observarse los tiempos de interrogación y respuesta:

- El interrogador envía la interrogación en modo A
- La aeronave responde en modo A.

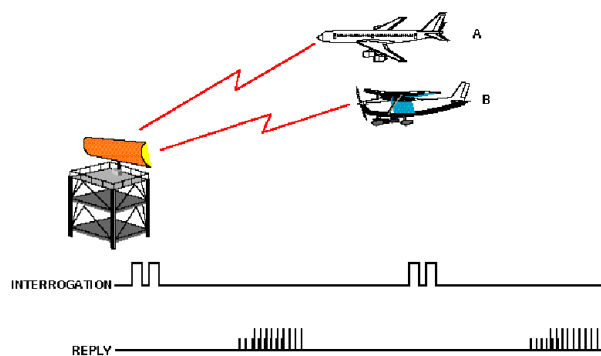


Figura 8: Sincronización de las respuestas en modo A. [\[5,Pag.1\]](#)

En caso de que concurren varias aeronaves en la cobertura del terminal aeroportuario (figura 8), se emite una interrogación a cada avión y se produce una respuesta en diferentes espacios de tiempo. Ello permite una correcta identificación de cada aeronave en fase de respuesta.

La confluencia de aeronaves y el aumento de la posibilidad de la misma da lugar al denominado Modo S.

2.2.2.2 El Modo S

2.2.2.2.1. Características

El Modo S se caracteriza por los siguientes aspectos:

- No necesita una interrogación inicial ya que es la misma aeronave quien emite tanto para otras aeronaves como para Torres de Control.
- Las emisiones, que tienen un tamaño de 1 Mbps, se realizan de forma autónoma, es decir, sin necesidad de interrogación.
- La información contiene características de su navegación.
- La información que emite corresponde a un standard internacional. La tipología de datos contenidos en esta información corresponde a un estándar y, por lo tanto, es siempre la misma.
- A efectos de este proyecto los parámetros que he analizado son: identificación de la aeronave, su altitud barométrica, su posición superficial, y la velocidad.

2.2.2.2.2. Preámbulo “anti-solape”

El preámbulo “anti-solape” se utiliza para evitar que la información que comunican las aeronaves se solape entre ellas. Para identificarlos, el preámbulo inicia con 4 pulsos que sirven para indicar a los receptores que la emisión está iniciando. Cada pulso

de emisión tiene un tamaño de 0,5 microsegundos. Además, los espacios entre pulsos tienen que respetar unos tiempos que son: (i) de 0.5 microsegundo (del 1er mensaje al 2º), (ii) de 2,0 microsegundos (del 2º al 3º) y (iii) de 0,5 microsegundos (del 3º al 4º).

2.2.2.2.3. Bloques de datos

El bloque de datos comienza a transmitirse tras el último pulso del preámbulo en el microsegundo 8 y su transmisión completa dura 112 microsegundos, intercambiando 112 bits de información.

En estos 112 bits se encuentran contenidos los datos considerados en el presente proyecto. Los 112 bits tienen una modulación ppm (posición por pulsos)

Para una mejor comprensión de las fases de preámbulo y bloque de datos véase la figura 9.

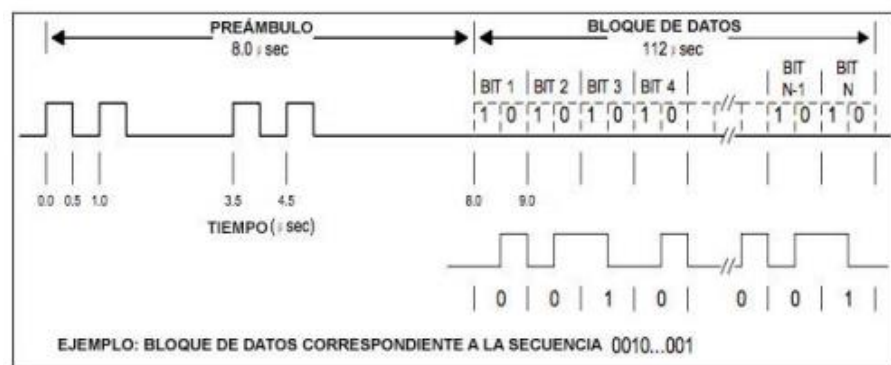


Figura 9: Formato del envío de datos. [24]

El pulso transmitido en la primera mitad del intervalo representa un 1, mientras que en la segunda mitad representa un 0. Esta modulación es muy resistente a interferencias para no suprimir pulsos, además de mantener la amplitud y los anchos fijos.

2.2.2.3 Formato de los pulsos en ADS-B

La normativa aplicable en materia de especificaciones en vehículos aerotransportados a 1.090 MHz detalla que:

- La amplitud entre pulsos no debe exceder los 2dB.
- El tiempo de subida del pulso ha de ser menos de 0.05 microsegundos o mayor que 0.1 microsegundos.
- El tiempo de bajada del pulso no debe ser menor que 0.05 microsegundos o mayor de 0.2 microsegundos.

2.2.2.4 Espacio entre pulsos

Los pulsos en la comunicación ADS-B comienzan desde un múltiplo de 0.5 microsegundos respecto del primer pulso. El espacio no ha de superar los 0.05 microsegundos desde el primer pulso transmitido.

2.2.2.5 Formato ADS-B

Los datos en ADS-B tienen dos formatos. El primero es para mensajes cortos (56 bits) y transmite solo información relativa a la dirección de la aeronave. El segundo formato (112 bits) se utiliza para mensajes más extendidos y permite el envío de información más relevante, como la anteriormente mencionada -objeto de estudio en este TFG-.

En nuestro caso, recogemos las señales del formato extendido y éstas constan de cinco partes. La figura 10 esquematiza las cinco partes de contenido. Sucesivamente, procedemos a su identificación y definición.

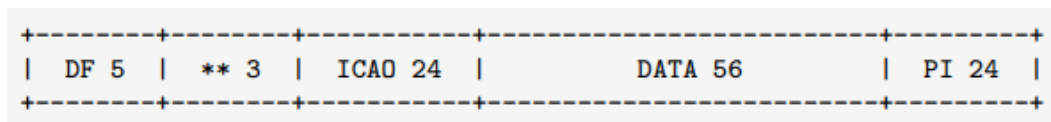


Figura 10: Cabecera 112 bits. [\[23,Pag.4\]](#)

nBits	Bits	Abbr.	Name
5	1 - 5	DF	Downlink Format
3	6 - 8	CA	Capability (additional identifier)
24	9 - 32	ICAO	ICAO aircraft address
56	33 - 88	DATA	Data
	[33 - 37]	[TC]	Type code
24	89 - 112	PI	Parity/Interrogator ID

Tabla 1: Estructura de mensaje ADS-B. [\[23,Pag.4\]](#)

1. **DF:** “Downlink Format”(Formato del enlace, tabla 1). Es el parámetro que sirve para identificar el protocolo utilizado para transmitir la información. En el caso de aeronaves civiles este parámetro siempre es el mismo (17). Por ejemplo, si la comunicación fuera de una aeronave militar el parámetro sería 18 o 19.
2. **CA:** “Capability” (Parámetro de competencia, tabla 1). Este parámetro nos permite identificar, a través de códigos ver (tabla 2) el sentido de la

comunicación, es decir, si ésta se produce desde el aire a tierra, desde la tierra al aire o entre ambas (tierra-tierra, aire-aire).

En el caso que nos ocupa hemos utilizado una comunicación de codificación 5 (Aire – Aire).

Codificación		Sentido Comunicación
Binario	Decimal	
000	0	Tierra a Aire.
100	4	Tierra a Tierra
101	5	Aire a Aire
110	6	Aire a Tierra / Tierra a Aire

Tabla 2: Códigos CA.[\[25\]](#)

3. **ICAO:** “International Civil Aviation Organization” (Dirección única del avión, tabla 1). Ofrece información que identifica de forma inconfundible la aeronave. Esta información se encuentra depositada en la World Aircraft Database [\[2\]](#). Contrastando la información obtenida con la base de datos mencionada se puede determinar la nacionalidad, la marca del avión, el número de serie, el modelo y el registro. Por ejemplo, si la aeronave es de nacionalidad española los primeros parámetros que transmite son 001101.
4. **ME:** “Message Extended Squitter” (Mensaje de Datos, tabla 1). Se trata del mensaje en sí mismo y tiene un tamaño de 56 bits por traza, desde la posición 33° a 88°. El mensaje contiene siete partes:
 - i. **“Type Code”** (Código tipo, tabla 1): sirve para diferenciar e identificar los distintos mensajes contenidos en los datos.

Código Tipo	Contenido
1 – 4	Identificación del avión
5 – 8	Posición superficial
9 – 18	Posición aerotransportada (altitud barométrica)
19	Velocidad aerodinámica
20 – 22	Posición aerotransportada (GNSS)
23 – 27	Reservado
28	Estado del avión
29	Información de vuelo y del estado
31	Estado de operación de la aeronave

Tabla 3: Tipos de Código.[\[23,Pag.6\]](#)

Como podemos observar (tabla 3):

- Con los valores 1 - 4 se identifica el avión.
- Con los valores 5 - 8 su posición superficial.

- Con los valores 9 - 18 su altitud barométrica. Para determinar la altitud barométrica se hace una comparación entre la presión atmosférica en tierra y la presión en vuelo.
 - Con el valor 19, se indica la velocidad de la aeronave.
 - Con los valores 20 - 22, la altitud calculada en base a la HAE (“Height Above Elipsoid”) que simula la tierra como un elipsoide y calcula la altura del avión. El resultado del cálculo de altitud HAE y la altitud barométrica no suele encontrar diferencias significativas (+/- 25 pies) pero éste último cálculo se realiza a efectos de comprobación.
 - Con el valor 28, se indica el estado del avión.
 - Con el valor 29 se indica la información del estado vuelo.
 - Con el 31 se indica el estado del avión.
- ii. **“Subtype Code”** (Código subtipo): es un código que abarca tres bits (del bit 38° al bit 40°). Si el valor es 0, el avión está en vuelo; si es 1 está en superficie y si es 2-7 el *status* está reservado.
- iii. **“Altitude”** (Altitud): es un código que abarca 12 bits (del bit 41 al bit 52).
- iv. **“Time”** (Tiempo): es el bit 53. Si está a 0 no transmite ninguna información; si está a 1 indica el tiempo, obtenido del GPS. La medición del tiempo se realiza por trigonometría y utilizando el retardo de señales.
- v. **“Compact Position Reporting”** (Posición Compacta Reportada). A través de una medición respecto a la distancia par/impar (hemisferio norte / sur) se identifica la posición de la nave (coordenadas de latitud y longitud). La información de cada coordenada ocupa 17 bits de espacio.
- **Latitud:** distancia desde donde se encuentre la aeronave en línea recta hasta la línea del ecuador.
 - **Longitud:** distancia en línea recta hasta el meridiano 0.
5. **Paridad de interrogación:** son 24 bits para comprobar si el mensaje se recibió correctamente. La comprobación se realiza a través de un código cíclico (CRC). Tanto el emisor como el receptor envían un código que se implementa sobre la base de la información comunicada y recibida. Si coinciden se da por buena la comunicación.

3 Pruebas y resultados

Partiendo de una primera recepción de señal capturada por el SDR RTL, cuya configuración se encuentra en el Anexo A, trataremos los siguientes puntos:

1. En primer lugar, analizaremos de forma general, la configuración y el diseño del software desarrollado para comprender el funcionamiento del decodificador ADS-B.
2. En segundo lugar, y utilizando este decodificador, procederemos a la decodificación de los datos recibidos a través de la señal capturada.
3. En último lugar, representaremos y verificaremos que lo recibido a nivel práctico a través de la señal, coincida con cuanto establecido a nivel teórico.

3.1 Previo análisis sobre la configuración y diseño del software desarrollado

1. El SDR RTL tiene la forma de un Pendrive y se inserta en un ordenador como si lo fuese por un puerto USB.
2. En el momento de la inserción se tiene que modificar el ancho de canal de 8 MHz a 2,4 MHz, mediante el controlador explicado detalladamente en el [Anexo A](#).
3. Una vez modificado el ancho de canal, se introducen los parámetros necesarios para captar las señales por ADS-B como se ejemplifica en la siguiente figura y en los parámetros contenidos en ella.

```
RX=comm.SDRRTLReceiver('0','CenterFrequency',fc,...  
    'EnableTunerAGC',true,'TunerGain',25,'SampleRate',fs,...  
    'OutputDataType','double','SamplesPerFrame',332800,...  
    'FrequencyCorrection',0);
```

Figura 11: Inicialización de parámetros del SDR-RTL.

A continuación, se enumera y define cada uno de los parámetros contenidos en la figura 11.

1. Acceso radio: colocado a 0 por defecto, porque en este caso solo usamos un dispositivo.
2. Frecuencia central (fc): a 1.090 GHz.
3. Control automático de ganancia (AGC): activado
4. Ganancia deseada del [sintonizador](#): 25dB.
5. Frecuencia de [muestreo](#) deseada (fs): 2.4MHz.
6. Salida de datos en forma de array: doble.

7. Muestras por trama: 332.800 datos por recepción.
8. Frecuencia Corrección: 0 (corrige en el rango de -10K a 10K)

Posteriormente, los 332.800 datos, que se observan en la imagen y que son recibidos por la señal, se pasan a Simulink -herramienta de Matlab-. Esta herramienta nos permite la conversión de datos a binario y los ordena en matrices con filas de 112 bits (formato extendido ADS-B).

Una vez ordenados los datos en matriz, iniciamos su análisis y comprobación.

1. Las filas de la matriz se convierten a formato hexadecimal y nos permiten comprobar el [ICAO](#) y contar el número de aeronaves que han comunicado.
2. Una vez determinado el número de aeronaves procedemos a decodificar la información.
 - a) Identificamos el campo [DF](#) para determinar que el parámetro sea 17, lo que indica que el formato es ADS-B y por lo tanto se trata de una aeronave civil; si no es así, se descarta la información.
 - b) Identificamos el tipo de código ([TC](#)), lo que nos permite obtener, entre otras, la siguiente información: identificación, posición (Latitud, Longitud), altitud y velocidad del avión.

3.2 Decodificación de los datos recibidos paso a paso.

A continuación, en este apartado se muestra un ejemplo del cálculo de los parámetros previamente mencionados.

- Identificación del avión:

TC,5	EC,3	C1,6	C2,6	C3,6	C4,6	C5,6	C6,6	C7,6	C8,6
------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

TC: Type code
EC: Emitter category

Figura 12: Campo en datos. [\[23,Pag.7\]](#)

Observamos que tenemos los campos [Código Tipo](#) y Categoría de Emisión. Este último define el tipo de avión: pesado, largo, pequeño, ligero, etc.

En los datos relativos a la identificación del avión hemos obtenido los siguientes valores:

8D 34508B 20 242170D32CE0

Para traducir estos valores a mensajes concretos en texto legible hay que transformarlos a través de la cabecera 112 bits ([Figura 9](#))

El mensaje se estructuraría en hexadecimal, binario y decimal del siguiente modo:

Campos=> Codificación	DF:	CA:	ICAO:	TC: & Datos:
Hexadecimal	8 D		34508B	2 0 <u>24 21 70 D3 2C E0</u>
Binario	10001	101	1101000101000010001011	00100 000
Decimal	<u>17</u>	<u>5</u>	3428491	<u>4</u> 0 18942854

Tabla 4: Conversión de datos recibidos.

Como hemos observado DF=17, TC=4, ICAO =34508B y Datos = 2421 70 D3 2C E0. Sabemos, por tanto, que se trata de una aeronave civil ([DF=17](#)) que está comunicando Aire-Aire (CA=5), que además tiene unas características de identificación del avión ([ICAO](#))

A continuación, la siguiente “array” (Fig.13) alfanumérico nos permite convertir de formato decimal a texto legible los datos de la aeronave.

```
#ABCDEFGHIJKLMNOPQRSTUVWXYZ####_#####0123456789#####
```

Figura 13: Array de comprobación de la decodificación. [\[23,Pag.7\]](#)

Los números se asocian con letras. A la letra A le corresponde con el numero 1 hasta la Z el número 26 y para los números del 0 al 9 la correspondencia se encuentra en los números del 48 al 57.

```
A - Z : 1 - 26
0 - 9 : 48 - 57
_ : 32
```

Figura 14: Conversión decimal a carácter. [\[23,Pag.7\]](#)

Los datos se convierten de hexadecimal a binario y de binario a decimal. Una vez está en decimal, se traduce a texto convirtiendo los números como en la figura 12 y 13. La tabla 5 muestra cómo se efectúa esta transformación.

Hexadecimal:	24 21 70 D3 2C E0							
Binario:	(001001)(000010)(000101)(110000)(110100)(110010)(110011)(100000)							
Decimal:	(9)	(2)	(5)	(48)	(52)	(50)	(51)	(32)
Texto:	(I)	(B)	(E)	(0)	(4)	(2)	(3)	(-)

Tabla 5: Conversión de la matrícula del avión.

Finalmente, la matrícula recibida es : **IBE0423-**

La siguiente traza de información con los datos ([Tabla 6](#)) nos desvela la posición en el aire en ese instante. El **TC** identificado tiene que ser un código entre 9 a 18 para que la traza recibida se refiera efectivamente a la posición del avión.

- **Posición en el aire** (latitud y longitud)
Procedemos a identificar la posición del IBE0423,

Data Bits	MSG Bits	N-bit	Abbr	Content
33 - 37	1 - 5	5	TC	Type code
38 - 39	6 - 7	2	SS	Surveillance status
40	8	1	NICsb	NIC supplement-B
41 - 52	9 - 20	12	ALT	Altitude
53	21	1	T	Time
54	22	1	F	CPR odd/even frame flag
55 - 71	23 - 39	17	LAT-CPR	Latitude in CPR format
72 - 88	40 - 56	17	LON-CPR	Longitude in CPR format

Figura 15 : Información de la traza de datos de altitud barométrica. [\[23,Pag.10\]](#)

Como podemos observar en la tabla

- Los primeros 5 bits son para el tipo de código
- Los siguientes 2 bits para el estado de vigilancia
- El siguiente bit para el NIC (Categoría de Integridad en la Navegación), que es reportada para que en las aplicaciones de vigilancia se puedan determinar si la posición contenida tiene un nivel aceptable de integridad para el uso previsto.
- Los 12 bits siguientes (del 41° al 52°) son para la altitud.
- El siguiente bit para el tiempo.
- El siguiente para el reporte de la posición compacta; para ver si es par o impar el código utilizado para determinar la posición global inequívoca. Este bit se encuentra en la posición 54, si sale a 0 es par y si sale 1 es impar.

- **Latitud:**

<i>TC & CA</i>	<i>ICAO 24</i>	<i>DATA</i>	<i>CRC</i>
8D	34508B	B1542F36CE1BE	2863A 7

Tabla 6: Datos de posición.

En binario y decimal, F:0 quiere decir que estos datos recibidos son pares.

<i>TC</i>	<i>ALT</i>	<i>T</i>	<i>F</i>	<i>CPR-LAT</i>	<i>CPR-LONG</i>
01011	0001010 1 0100	0	0	10111100110110110	01110000110111110
				96694	57790

Tabla 7: Payload en binario.

La tabla 6 y 7 referencia la traza de bits par, con TC=11, DF=17 con la misma dirección ICAO: 40621D. Suponemos que el primer mensaje es el más reciente en su recepción. Tenemos la posición par codificada en 17 bits y la normalizamos dividiendo por su máximo 2^{17} : 131072. Con CPR y índice.

$$\text{CPR_Latitud_Par} = \frac{96694}{131072} = 0.737718 \text{ y } \text{CPR_Longitud_Par} = \frac{57790}{131072} = 0.4409$$

$$j = \text{floor}\left(59 \cdot 0.737718 - 60 \cdot 0.631 + \frac{1}{2}\right) = \text{floor}(6.165362) = 6$$

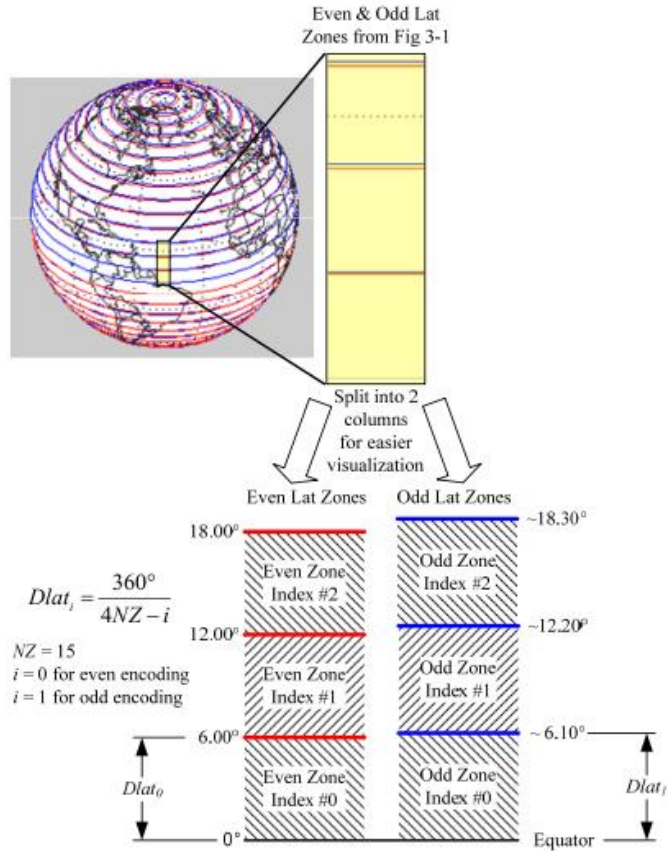


Figura 16: Zonas pares e impares.^b[\[4,Pag:1,Fig:Dlat2.png\]](#)

Con NZ se toma de referencia el 15 y dLat^c

$$dLat_{\text{even}} = \frac{360}{4 \cdot NZ} = \frac{360}{60}$$

Figura 17: Constantes geográficas. [\[23,Pag.12,Fig:1.4\]](#)

Finalmente, para calcular la latitud par es:

$$Latitud_{\text{par}} = dLat_{\text{even}(\text{par})} \cdot [\text{mod}(6,60) + Lat_{\text{CPRPar}}] = 40.426308 \text{ grados}$$

$$6 \cdot (\text{mod}(6,60) + 0,737718) = 40,426308$$

Para el hemisferio sur, los valores caerán de 270 a 360 grados. Tenemos que asegurarnos de que la latitud está dentro del rango [-90, +90] :

^b Dependiendo de donde este el avión, la comprobación de la posición es distinta midiendo la par e impar se verifica correctamente.

^c Dlat; constante geográfica.

$$\text{Lat}_{\text{even}} = \text{Lat}_{\text{even}} - 360 \quad \text{if } (\text{Lat}_{\text{even}} \geq 270)$$

Figura 18: Comprobación de latitudes. [\[23,Pag.13,Fig:1.6\]](#)

La latitud final se elige en función del tiempo, la más reciente recibida es par: finalmente, sale: **40.4263 grados**.

- **Longitud:** para el Cálculo de la longitud necesitamos obtener NL^d .

$$NL(lat) = \text{floor} \left(\frac{2\pi}{\arccos\left(1 - \frac{1 - \cos\left(\frac{\pi}{2 \cdot NZ}\right)}{\cos^2\left(\frac{\pi}{180} \cdot lat\right)}\right)} \right)$$

Figura 19: Función número de zonas de longitud. [\[23,Pag.10,Fig:1.2\]](#)

Dado el ángulo de latitud (lat). El valor entero devuelto está limitado dentro de [1, 59], sale que $NL(lat_par) = \text{floor}(59.9954) = 59$ con $Nz=15$ y lat: 40.4263 grados.

$$\begin{aligned} ni &= \max(NL(\text{Lat}_{\text{even}}), 1) \\ dLon &= \frac{360}{ni} \\ m &= \text{floor} \left\{ Lon_{\text{cprEven}} \cdot [NL(\text{Lat}_{\text{even}}) - 1] - Lon_{\text{cprOdd}} \cdot NL(\text{Lat}_{\text{even}}) + \frac{1}{2} \right\} \\ Lon &= dLon \cdot (\text{mod}(m, ni) + Lon_{\text{cprEven}}) \end{aligned}$$

Figura 20: Ecuaciones sobre longitud. [\[23,Pag.13,Fig:1.8\]](#)

$$ni = 59; dLon = 6.1016; m = \text{floor}(-0.3789) = -1$$

$$\text{Longitud: } 6.1016 \cdot (\text{mod}(-1, 59) + 0.4409) = 356.5885$$

Si el resultado es mayor de 180 grados:

$$Lon = Lon - 360 \quad \text{if } (Lon \geq 180)$$

Figura 21: Fórmula de configuración de la longitud.
[\[23,Pag.14,Fig:1.10\]](#)

^d NL: Numero de Zonas de Longitud.

Finalmente, la Longitud = -3.4114

Posición final **Latitud: 40.4263** y **Longitud: -3.4114**



Figura 22: Posición final del avión para traza de datos. [<https://www.coordenadas-gps.com/>]

En este caso, en vez de comprobar la latitud y longitud par e impar, se ha realizado mediante la par, debido a que su recepción es previa a la impar.

La información sobre la altitud está contenida en el bloque de datos, en la parte relativa a la posición en el aire. La altitud, que tiene un tamaño 12 bits, va desde la posición 9° a la 20°, existiendo un bit de referencia llamado Q-bit en la posición 48 que indica si el dato mandado está en múltiplos de 25 o de 100 (a 1 o 0 respectivamente).

- **Altitud:** a continuación, procedemos a decodificar la altitud del avión recibiendo:

Datos de la altitud: 0001010 **1** 0100 => 0001010 0100 => 164

El Q-bit es 1, por lo tanto, está en múltiplos de 25 :

$$Altitud = 164 \cdot 25 - 1000 = 3100 \text{ pies} = 944,88 \text{ m}$$

Procedemos a decodificar la **velocidad del avión**: exigen dos tipos de velocidades determinadas por 3 bits del 38 al 40 ambos incluidos, el tipo 1 y 2 es la velocidad superficial y el tipo 3 y 4 es la velocidad aérea, es decir, para aviones supersónicos, pero no existen muchos actualmente. Comúnmente se usarán los tipos 1 y 2.

- ❖ **Subtipo 1 y 2:** velocidad subsónica siempre descompuesta de Norte a Sur o de Este a Oeste. Con los datos recibidos:

<i>TC & ST</i>	<i>ICAO 24</i>	DATOS	<i>CRC</i>
8D	34508B	9944060A880817	5B284F

TC	ST	IC	RESV-A	NAC	S-EW ^e	V-EW
10011	001	0	1	000	1	0000000110

S-NS ^f	V-NS ^g	VrSrc ^h	S-Vr	Vr ⁱ	RESV-B	S-Dif	Dif ^j
0	0001010100	0	1	000000010	00	0	0010111

Tabla 8: Datos recibidos para decodificar y calcular la velocidad.

Verificamos que el bit 46 (S_EW) está a 1, indicando que el avión vuela de Este a Oeste; en cambio, si saliera 1 volaría desde el Oeste hacia el Este. A continuación, revisamos el bit 57: si recibes 1 el avión está volando de Norte a Sur; por el contrario, si recibo 0 sería de Sur a Norte (tabla 8). Toda información se referencia al estándar:

MSG Bits	Data Bits	Len	Abbr	Content
33 - 37	1 - 5	5	TC	Type code
38 - 40	6 - 8	3	ST	Subtype
41	9	1	IC	Intent change flag
42	10	1	RESV_A	Reserved-A
43 - 45	11 - 13	3	NAC	Velocity uncertainty (NAC)
46	14	1	S_ew	East-West velocity sign
47 - 56	15 - 24	10	V_ew	East-West velocity
57	25	1	S_ns	North-South velocity sign
58 - 67	26 - 35	10	V_ns	North-South velocity
68	36	1	VrSrc	Vertical rate source
69	37	1	S_vr	Vertical rate sign
70 - 78	38 - 46	9	Vr	Vertical rate
79 - 80	47 - 48	2	RESV_B	Reserved-B
81	49	1	S_Dif	Diff from baro alt, sign
82 - 88	50 - 56	7	Dif	Diff from baro alt

Figura 23: Contenido de los datos de la velocidad. [23,Pag.11]

Esta figura 23 contiene algunos parámetros del estándar general de ADS-B como, por ejemplo: el tipo de código, velocidad y otras medidas de presión.

^e S_EW: Flag, para indicar que existe la velocidad de Este-Oeste.

^f S_NS: Flag, para indicar que existe la velocidad de Norte-Sur.

^g V-NS: Velocidad de Norte-Sur.

^h VrSrc: Flag, para determinar si el avión asciende o desciende.

ⁱ Vr: Velocidad vertical.

^j Dif: Diferencia respecto a la altitud, barométrica.

➤ **Velocidad horizontal:**

La velocidad y el ángulo h se calculan de la siguiente manera:

$$V_{we} = \begin{cases} -1 \cdot (V_{ew} - 1) & \text{si } s_{ew} = 1 \\ V_{ew} - 1 & \text{si } s_{ew} = 0 \end{cases} \quad V_{sn} = \begin{cases} -1 \cdot (V_{ns} - 1) & \text{si } s_{ns} = 1 \\ V_{ns} - 1 & \text{si } s_{ns} = 0 \end{cases}$$

Con V_{we}^k y V_{sn}^l

$$v = \sqrt{V_{we}^2 + V_{sn}^2}$$

$$h = \arctan2(V_{we}, V_{sn}) \cdot \frac{360}{2\pi} = 315.8805 \text{ (grados)}$$

Si saliera un valor negativo, le sumariamos 360 grados.

$$h = h + 360 \text{ (si } h < 0)$$

Tenemos que con los datos anteriores:

$$V_{ew}: 0000000110 : 6$$

$$S_{ew} = 1$$

$$V_{ns} : 0001010100 : 84$$

$$S_{ns} = 0$$

Operando tenemos:

$$V_{we} = -(6 - 1) = -5$$

$$V_{sn} = (84 - 1) = 83$$

$$v = 83,1504 \text{ (kt)}$$

$$h = 315.8805 \text{ (grados)}$$

Convertimos la velocidad a km/hora $V \cdot 1,852 = 153,9946 \frac{km}{h}$

➤ **Velocidad vertical:** Inicialmente verificamos el bit 69 S_{vr} si esta a 1 el avión desciende sino sube. Bit 69 a 1

^k V_{we} : Velocidad de Oeste-Este.

^l V_{sn} : velocidad de Sur-Norte.

El **ratio vertical**, V_r es el valor de 8 bits entre el 70 al 78.

$$V_r: 000000010 : 2$$

$$V_r: (2 - 1) \cdot 64 : 64 \text{ fpm}$$

Convirtiendo 196,85 pies por minuto son 1 metro/s, por lo tanto, tenemos **0.3251** metros/segundo y como el bit 69 está a 1 **desciende**.

Finalmente, el bit 68 nos indica como se ha medido la velocidad mediante el ratio de velocidad vertical; si está a **0** se midió mediante un barómetro de presión para conocer la altitud y si está a 1 se mide con la altitud geométrica.

3.3 Demostración sobre la ejecución en Matlab y comprobación sobre el software externo

En este capítulo se muestran los resultados y pruebas a través de la ejecución del software utilizado para decodificar la información ADS-B.

Usando el software principal, que inicialmente lee los datos del SDR-RTL, seguidamente, los añade a una estructura de 112 bit; en estos, dependiendo del valor del código tipo obtenido, se llama a una función u otra para decodificarlos. Una vez se realiza el cálculo y se guardan los datos en variables, se muestra todo y finalmente se repite la recepción de datos repetidamente para aproximar la recepción a tiempo real.

La representación es mediante el almacenamiento de la terminal de Matlab:

```
identificacion_aeronave =  
    'IBE0423_'
```

Figura 24: matrícula del avión IBE0423.

```
LATITUD = 40.426300  
LONGITUD = 356.588562  
LONGITUD = -3.411438  
ALTITUD = 3100.000000 pies
```

Figura 25: datos del IBE0423.



Figura 26: posición IBE0423 a las 10:09am el 1 de mayo 2019.
[<https://www.coordenadas-gps.com/>]

La ejecución mediante el software externo tiene su previa configuración descrita en el [Anexo B](#).

La figura 27 indican el ICAO, país, matrícula del avión, altitud, latitud, longitud y finalmente la velocidad.

34508B	Spain	IBE0423	2825	40.43	-3.50	154
--------	-------	---------	------	-------	-------	-----

Figura 27: Información decodificada automáticamente.

```
Velocidad= 153.973642 km/h
Mensaje de velocidad
```

Figura 28: Velocidad IBE0423.

En los datos representados anteriormente (Figs.24 – 28) podemos observar que tienen un error casi despreciable y es debido a que, al pasar del software desarrollado al externo, existe un retardo en la configuración de aproximadamente de 1 minuto.

El error estimado para la latitud es de: 0,0091%, para la longitud: 2,53%, para la altitud: 9,73% y en la identificación es claramente el mismo avión. Google nos confirma que la identificación del avión es correcta:

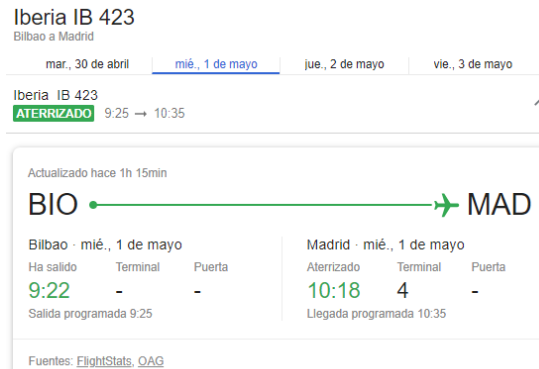


Figura 29: Comprobación de la existencia del avión.

La captura representada anteriormente, fue recogida el 1 de mayo a las 10:09 minutos antes de su aterrizaje en Madrid a unos aproximados 2900 pies son unos 883,92 metros.

Finalmente, realizamos otra representación basándonos en la misma estructura:

```
identificacion_aeronave =  
    'TRA98W'
```

Figura 30: identificación TRA98W.

```
LATITUD = 40.334503  
LONGITUD = 356.708202  
LONGITUD = -3.291798  
ALTITUD = 38800.000000 pies
```

Figura 31: datos del TRA98W.

```
Mensaje de velocidad  
Velocidad= 435.107161 km/h
```

Figura 32: velocidad del TRA98W.

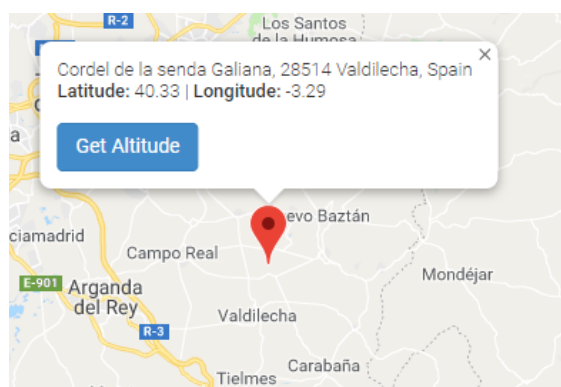


Figura 33: Posición del avión por latitud y longitud.
[\[www.coordenadas-gps.com/\]](http://www.coordenadas-gps.com/)

Nr.	ICAO24	Regist.	Ident	Alt	Lat	Long	Speed
0	484C9B	Netherlands	TRA98W	39000	40.33	-3.29	434

Figura 34: Avión detectado por el software externo.

El avión TRA98W detectado por el software desarrollado y por el Externo (Figs. 30 – 35).

Los errores de Latitud son aproximadamente 0% ya que, en los datos recogidos de forma automatizada sale 40.33°, para la altitud un error de 0,5128% y para longitud un error mínimo muy cercano a 0%.

EIN

Eindhoven (EHEH)

AGP

Málaga (LEMG)

Remove Ads

07:59 CEST

Scheduled 07:50

10:27 CEST

Scheduled 10:40

Duration: 02h50m

©Sebastian Eckhardt

PH-HXM

BOEING 737-800WL (B738)

Figura 35: Información comparada por ADS-B online.[\[www.radarbox24.com\]](http://www.radarbox24.com)

4 Conclusiones y trabajo futuro

4.1 Conclusiones

En este Trabajo Fin de Grado se ha diseñado y desarrollado un software decodificador de las señales de comunicaciones entre aviones y torres de control aeroportuaria. Como conclusión:

- Hemos analizado y comprendido la tecnología ADS-B y su importancia en la seguridad aérea. Hemos identificado que sería necesario fomentar métodos de cifrado que protejan la información de eventuales ataques o malos usos.
- Hemos examinado y entendido a fondo la tecnología SDR y ADS-B, consiguiendo el objetivo principal del proyecto, captar los datos de la posición, identificación, velocidad de los aviones reales, así como verificarlos.
- Tras las pruebas realizadas podemos concluir que el sistema instaurado funciona con unos errores mínimos.

Finalmente, hemos satisfecho los objetivos y metas propuestas para este Trabajo Fin de Grado.

4.2 Trabajo futuro

Hemos podido particularizar a través de este trabajo la existencia de elementos de información críticos que no están protegidos y que podrían ser objeto de ataques o vulneración.

El desarrollo natural de este trabajo sería el encontrar un método de protección para asegurar la comunicación de estos sin interferencias indeseadas por parte de terceros .

Referencias

- [1] ICAO(International Civil Aviation Organization), “NACC/DCA3-WP/05”, September 2008
- [2] Bob Stewart, Kenneth Barlee, Dale Atkinson, Louise Cockett,”Software Define Radio using Matlab & Simulink and the RTL-SDR” 1st Edition (revised), Department of Electronic and Electrical Engineering, Univeristy of Starthclyde, Glasgow, Scotland, UK, 2017, Pag 8 Fig:1.6, Pag 11, Fig:1.7 a),1.7 b), 1.7 c), Pag:19 Fig:1.11, Pag:48, Fig:3.4 Vertical Linear Polarisation, Pag: 16, Fig: 1.9
- [3] SCT Mexico, “Dirección general de aeronáutica civil”, Pag:16 Fig:2-6 “Respuesta en Modo S”, 2012
- [4] Mrdesc, “ADS-B Decodificación, Teoría”, 2013, Fig: ModeA-C.png, VariosAvionesA-C.png & Dlat2.png (<https://descsecurity.files.wordpress.com/2013/04/modea-c.png>)
- [5] A. A. Ghirardi, Radio Physics Course, 2nd ed. New York: Rinehart Books, 1932, p. 249
- [6] F. Langford Smith (ed) Radiotron Designer's Handbook, 3rd Edition (Wireless Press 1946) Page 99
- [7] Leon W. Couch II (1993). Digital and Analog Communication Systems. Prentice Hall.
- [8] Dyer, S. A.; Harms, B. K. (1993). "Digital Signal Processing". In Yovits, M. C. (ed.). Advances in Computers. 37. Academic Press. pp. 104. doi:10.1016/S0065-2458(08)60403-9. ISBN 9780120121373.
- [9] Crecraft, David; Gorham, David (2003). Electronics, 2nd Ed. CRC Press. p. 168. ISBN 978-0748770366.
- [10] Beer, Nick (1998). Servicing Satellite TV Equipment. Newnes. p. 119. ISBN 0-7506-3425-1.
- [11] "Demodulator - Definitions from Dictionary.com". dictionary.reference.com. Retrieved 2008-05-16.
- [12] J. A. Fleming, The Principles of Electric Wave Telegraphy and Telephony, London: Longmans, Green & Co., 1919, p. 364
- [13] Stephen J. Bigelow, Joseph J. Carr, Steve Winder, Understanding telephone electronics Newnes, 2001 ISBN 0-7506-7175-0.
- [14] Rinehart, Ronald E. (1991). Radar for Meteorologists. University of North Dakota. Radar engineers have added the automatic switch (also called a duplexer) in the ... As soon as the transmitter stops sending a signal, the duplexer switches so that the receiver is now connected to the antenna
- [15] Godse, A.P.; Bakshi, U.A. (2009). Linear Integrated Circuits And Applications. Technical Publications. p. 497. ISBN 8189411306.
- [16] Shipman, James; Wilson, Jerry D.; Higgins, Charles A. (2015). An Introduction to Physical Science, 14th Ed. Cengage Learning. p. 187. ISBN 1305544676
- [17] David K Cheng: “Field and Wave Electromagnetics”, Addison-Wesley Publishing Company Inc., Edition 2, 1998. ISBN 0-201-52820-7

- [18] Yang, James Ching-Nung (October 10, 2001). "What is OFDM and COFDM?". Shoufeng, Hualien 974, Taiwan: Department of Computer Science and Information Engineering National Dong Hwa University. Retrieved 2017-04-16. (<http://sna.csie.ndhu.edu.tw/~cnyang/MCCDMA/tsld004.htm>)
- [19] J.H.Stott. "The how and why of COFDM" BBC Research and Development, EBU Technical Review. 1999 (https://tech.ebu.ch/docs/techreview/trev_278-stott.pdf)
- [20] John Errington's Data Conversion Website (<http://www.skillbank.co.uk/SignalConversion/adc.htm>)
- [21] Electronics Notes, TCXO, Temperature Compensated Crystal Oscillator (https://www.electronics-notes.com/articles/electronic_components/quartz-crystal-xtal/tcxo-temperature-compensated-crystal-xtal-oscillator.php)
- [22] Dr. Phil, "Realtek RTL2832U The mystery chip at the heart of RTL-SDR" 2015. <http://antena.fe.unilj.si/literatura/Razno/Diplome/Radioteleskop/kljuci/RTL2832U.pdf>
- [23] Junzi Sun, "The 1090MHz Riddle; An open-access book about decoding Mode-S and ADS-B data." 2017, Pag 4, Pag 6 table 1.2 Pag 7, Pag 10, Pag 13, Pag 14.
- [24] Norma DO-260B,"Minimum Operational Performance Standards for 1090MHz Extended Squitter", RTCA, Inc, 1828.
- [25] ICAO(International Civil Aviation Organization), "NACC/DCA3-WP/05", September 2008

Glosario

<i>ADC</i>	Analog-Digital Converter, Conversor Analógico-Digital.
<i>ADS-B</i>	Automatic Dependent Surveillance-Broadcast, Sistema de Vigilancia Dependiente Automática en Difusión.
<i>DAC</i>	Digital-Analog Converter, Conversor Digital-Analógico.
<i>DF</i>	Downlink Format, Formato de Enlace.
<i>DPSK</i>	Differential Phase Shift Keying, Desplazamiento Diferencial de Fase.
<i>DSP</i>	Digital Signal Processor, Procesador digital de Señal.
<i>ICAO</i>	International Civil Aviation Organization, Organización Internacional de la Aviación Civil.
<i>IF</i>	Intermediate Frequency, Frecuencia Intermedia.
<i>PPM</i>	Pulse-Position Modulation, Modulación por Posición de Pulso.
<i>RF</i>	Radio Frequency, Radio Frecuencia.
<i>RLT-SDR</i>	Realtek Software Define Radio, Software Definido por Radio.
<i>SDR</i>	Software Define Radio, Software Definido por Radio
<i>TC</i>	Type Code, Código Tipo.

Anexos

A Configuración del SDR con Matlab

Para poder ejecutar el SDR con el ordenador es necesario tener previamente esta serie de paquetes en Matlab con una versión mínima de 2017 en adelante:

- DSP System Toolbox.
- Communications System Toolbox.
- Signal Processing Toolbox.
- Communications System Toolbox Support Package for RTL-SDR Radio.

Una vez instalado estos paquetes reiniciamos Matlab haciendo “click” en “Add-Ons” en la parte de “Manage Add-Ons”:

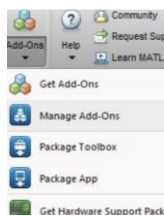


Figura 36: panel de Add-Ons.

Una vez abierto “Manage Add-Ons”:

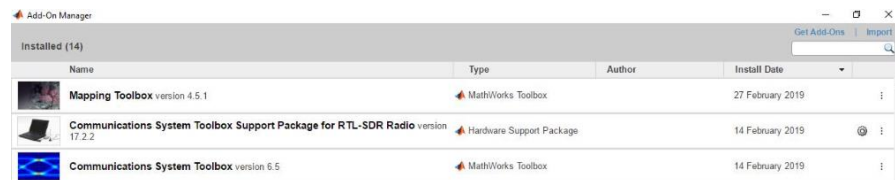


Figura 37: Add-Ons Manage.

Pulsamos “click” en el botón de "setup" de “Communications System Toolbox Support Package for RTL-SDR Radio”, a continuación, nos aparece el panel para conectar el SDR RTL.



Figura 38: “Setup” del SDR en Matlab.

Tras insertar el dispositivo SDR RTL pulsamos en el botón “next” y pasamos a configurar en él, el controlador “Zadig”, que es un driver para acceder a “libusb” basado en aplicación, actualiza el driver del “USB” y permite acceso a “winUSB”. También es necesario actualizar el driver para el RTL SDR que se fabricó en otras cosas para decodificar televisión digital con un ancho de banda de 8 MHz por ello para un mejor análisis y captura, se modifica el “sample rate” a 3,2 MHz o 2,4 MHz.

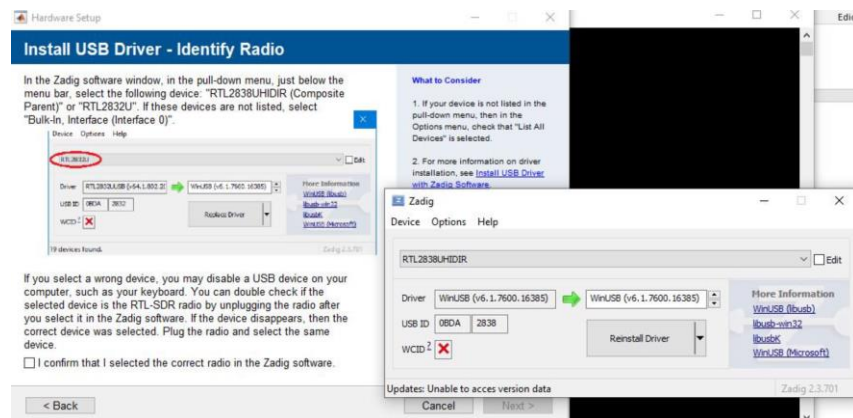


Figura 39: Instalación de los drivers con Zadig.

Tras instalar los drivers terminamos la configuración del SDR RTL con Matlab.

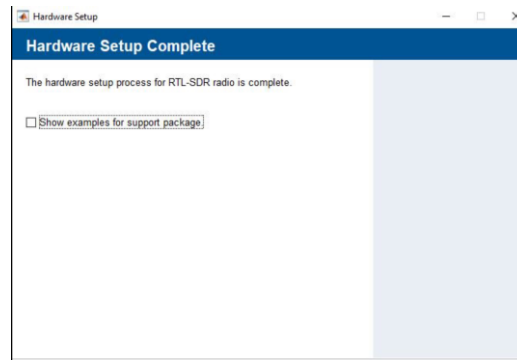


Figura 40: final de la configuración del SDR en Matlab

Verificamos que todo el SDR-RTL con el comando “sdrinfo”:

```
>> sdrinfo

ans =

    RadioName: 'Generic RTL2832U OEM'
   RadioAddress: '0'
   RadioIsOpen: 0
    TunerName: 'R820T'
   Manufacturer: 'Realtek'
         Product: 'RTL2838UHIDIR'
    GainValues: [29x1 double]
   RTLCrystalFrequency: 28800000
   TunerCrystalFrequency: 28800000
    SamplingMode: 'Quadrature'
    OffsetTuning: 'Disabled'
```

Figura 41: verificación de configuración y parámetros básicos.

B Configuración del software externo:

A continuación, vamos a configurar el sistema externo para la verificación de las aeronaves vía “RTL1090” y “adsbscope”:

Descargar el software desde aquí: <https://rtl1090.com/> y realizando la instalación de forma normal, abriendo el ejecutable descargado hacemos “click” en “New Install”.

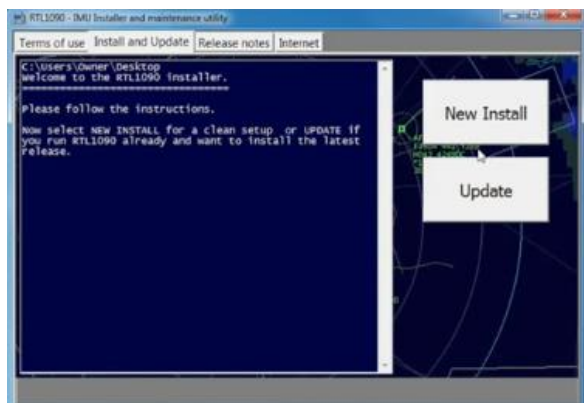


Figura 42: Instalación RTL1090.

Posteriormente, se recomienda que para la versión de “Windows”, decir donde quieres almacenar el programa, es decir, en que directorio , una vez finalizada la instalación.

Insertar el dispositivo, para ser configurado con “Zadig” , le aparece un breve tutorial de como configurarlo que sirve para reducir el ancho de canal y finalmente se abre el programa haciendo click en “Start” empieza a recibir datos e incluso a listar aviones, pero de forma poco visual por lo que hacemos uso de un software específico que incluye mapa y el listado de la información pasada del “RTL1090” a “adsbscope”.

Para “adsbscope” ser descomprime la carpeta descargada en:

(http://www.sprut.de/electronic/pic/projekte/adsb/adsb_en.html#downloads)

Se accede al directorio:

(../adsb_all\adsb_all\pc_software\adsbscope\27\adsbscope27_256.exe) abriendo el ejecutable:

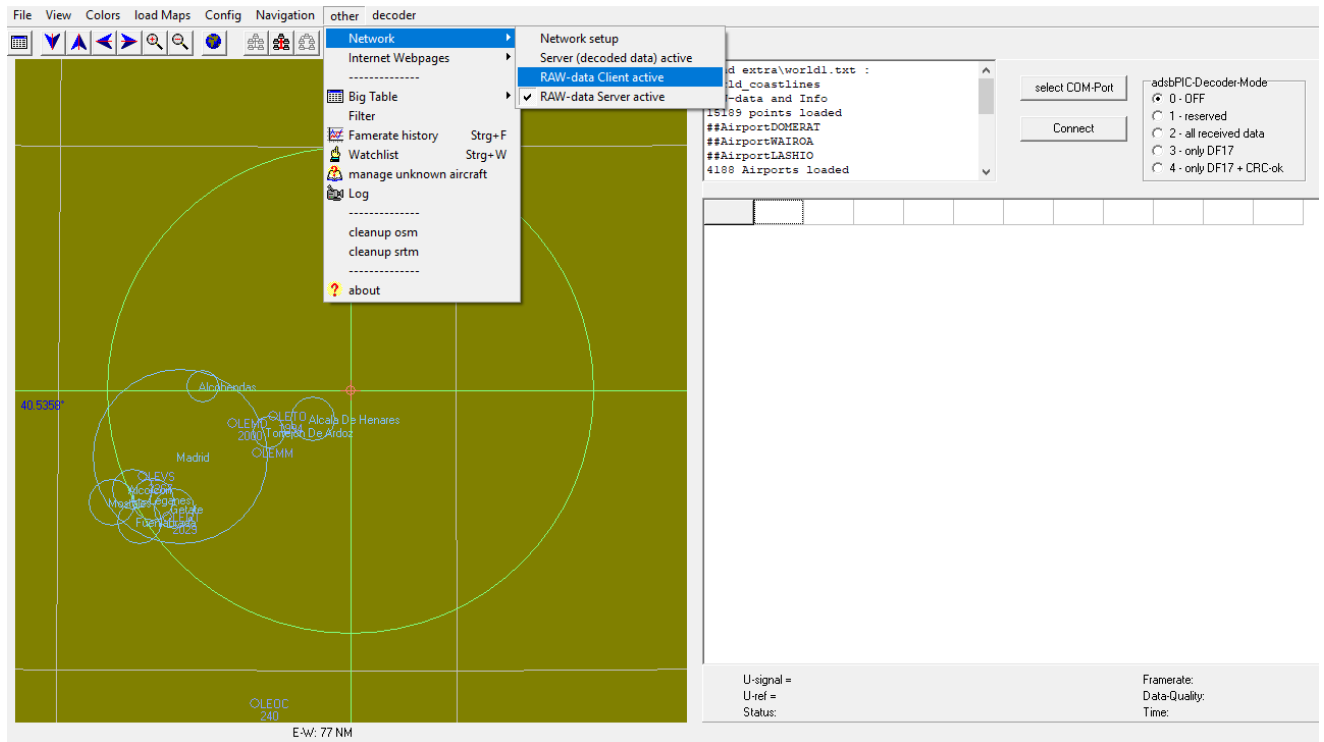


Figura 43: Configuración del software automatización adscope.

Activamos “Raw-data client” para que el “RTL1090” para empiece a comunicarse con “adscope”, listando y representando los aviones capturados al mapa.

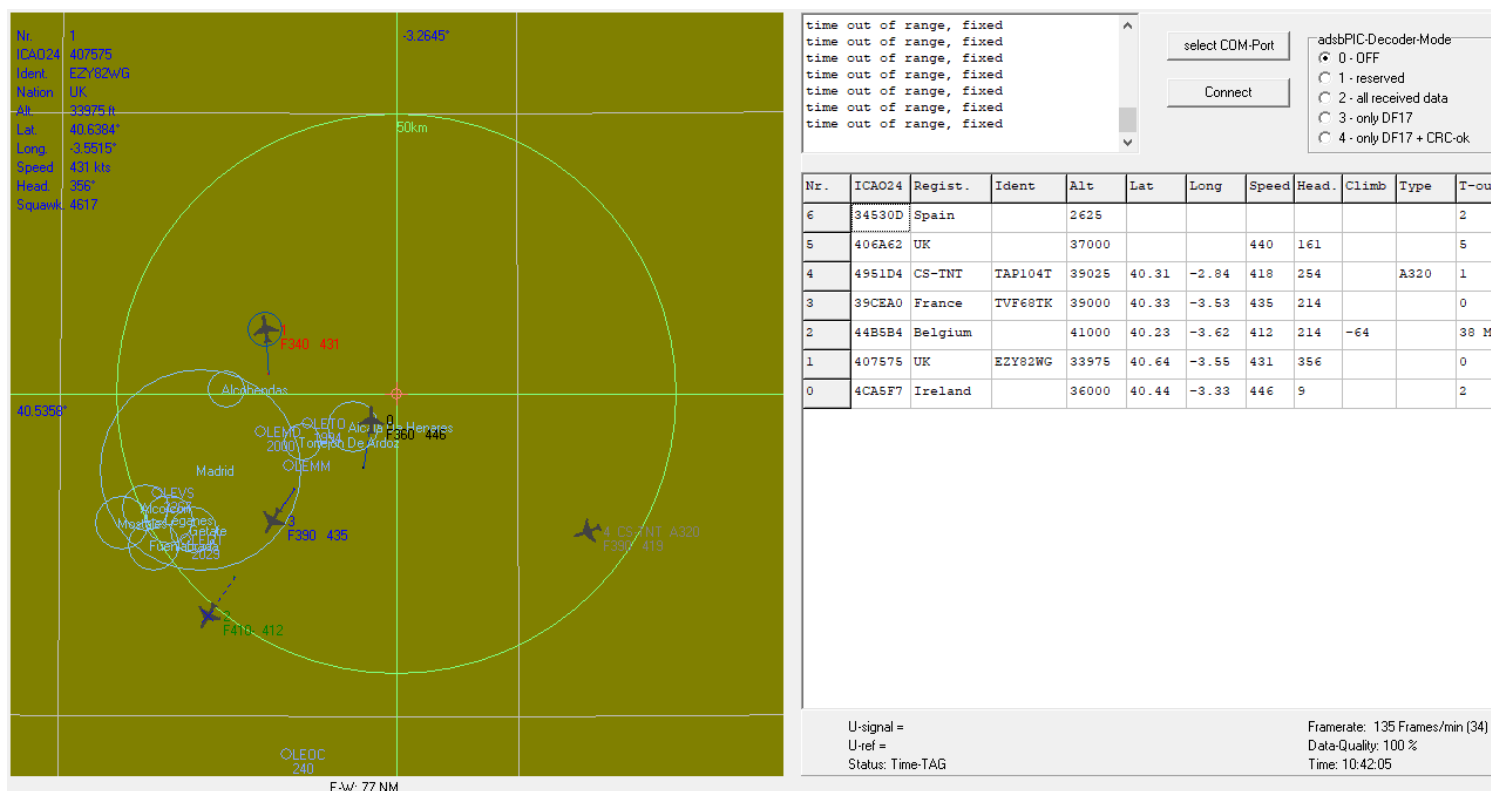


Figura 44: Demo adsbscope.

En esta demo podemos listar seis aviones y ver algunos en el mapa además de tener alguno su matrícula altitud, latitud, longitud y velocidad.

Para tener una configuración más certera, se comprueba la matrícula con la página web: “www.radarbox24.com” :

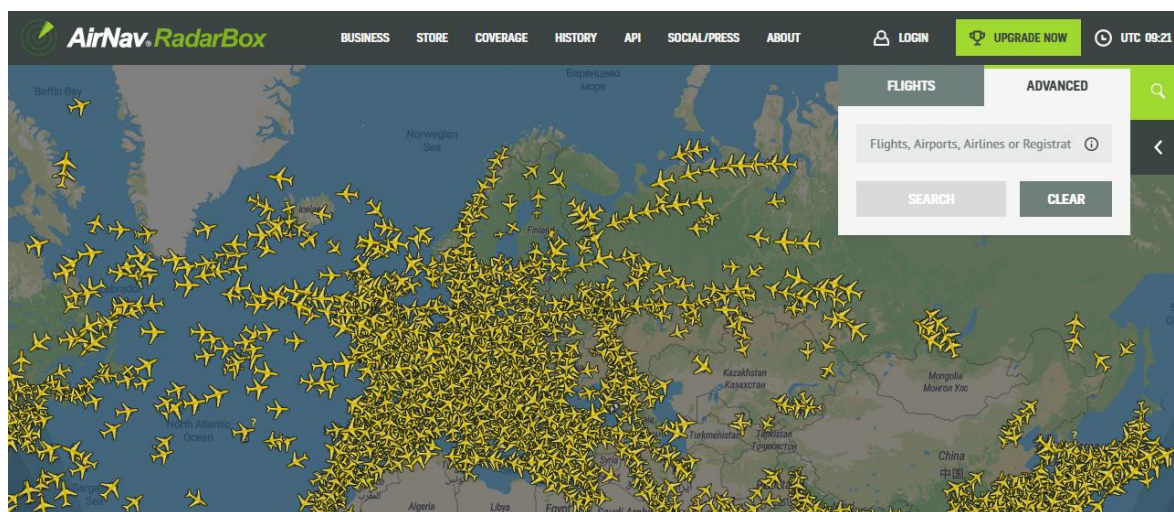

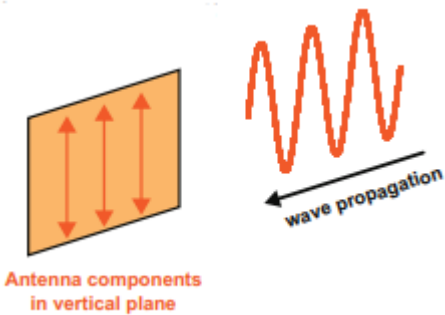
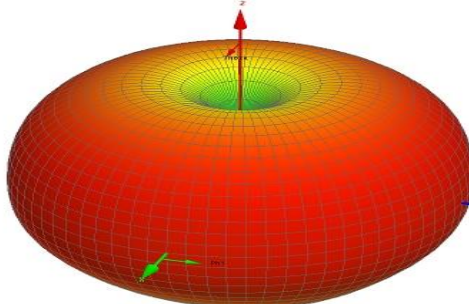


Figura 45: Panel general RadarBox24.com

C Definiciones

- **Conversor Analógico-Digital:** dispositivo que convierte las señales de entrada de tiempo continuo (analógico), con el objetivo de transformarlas a señales de valores discretos (digitales), equitativamente en tiempo y amplitud, esta conversión incluye *cuantificación* de la señal analógica entrante, con un pequeño error debido al ruido.
- **Cuantificación :** es un método matemático en el procesamiento digital de señal que introduce mapeo de valores continuos para conseguir una salida con elementos finitos por redondeo o truncamiento.
- **Conversor Digital-Analógico:** es un dispositivo que convierte valores digitales en analógicos, mediante un filtro de reconstrucción (para asegurar que la señal analógica de salida no contenga componentes de frecuencia superiores respecto de la máxima). Usa interpolación para sacar datos entre impulsos, en la práctica se transforman los números, hacia la función escalón creada mediante secuencia de funciones rectangulares.
- **“Mixer” o Mezclador:** es un componente electrónico no lineal que crea nuevas frecuencias partiendo de dos señales entrantes, normalmente se suman o se restan las frecuencias de ambas señales.
- **RF o Radio Frecuencia:** es el uso de señales con un ratio de oscilación sea en corriente alterna o en voltaje, también en campo eléctrico o magnético con un rango de frecuencias entre (20kHz) hasta (300GHz).[\[5,P.249\]](#)
- **IF o frecuencia intermedia:** es la frecuencia a la que se desplaza la portadora como paso intermedio en la transmisión o en la recepción. [\[6,P.99\]](#)
- **Banda base:** es una señal característica que tiene una gama de frecuencias cercanas a cero. [\[7\]](#)
- **D.S.P o Procesador de Señales Digitales:** es un microprocesador especializado en realizar operaciones de procesamiento de señal digital. [\[8,P.104\]](#)
- **Amplificador:** es un componente electrónico cuyo objetivo es incrementar la intensidad, voltaje o potencia de una señal entrante.[\[9,P.168\]](#)
- **Filtro:** es un dispositivo utilizado para eliminar ciertas componentes no deseadas de una señal de entrada.

- **Modulador:** es un dispositivo electrónico, por el cual se le introduce una señal con una frecuencia inicial y a la salida se obtiene la misma señal con la frecuencia desplazada a la cual es necesaria emitirse o tratarse. [\[10,P.119\]](#)
- **Demodulador:** es un componente electrónico o software utilizado para recuperar el contenido de la señal portadora recibida previamente modulada. [\[11\]](#)
- **Detector Radio:** es un dispositivo electrónico que extrae información de una corriente o voltaje de frecuencia modulada. [\[12,P.364\]](#)
- **Acoplador direccional:** es un dispositivo electrónico pasivo, es decir compuesto por componentes pasivos como (Resistencias, Condensadores, Bobinas e Inductancias...etc.) utilizados en *Radio Frecuencia*. Acopla una cantidad definida de potencia electromagnética en una línea de transmisión a un puerto que permite que la señal se utilice en otro circuito. [\[13\]](#)
- **Rectificador:** es un dispositivo eléctrico que transforma la corriente alterna (CA) en corriente continua (CC), que fluye en una sola dirección.
- **Banda Ancha:** es la transmisión de datos de gran capacidad transportando múltiples señales de distintos tipos de tráfico, normalmente mediante fibra óptica.
- **Repetidor:** es un dispositivo electrónico que recibe una señal y la retransmite con el objetivo de extender las transmisiones.
- **Conmutador:** es un componente o dispositivo electrónico que permite seleccionar entre varias señales desviándolas de un conducto a otro, es decir haciendo de interruptor o desviador de señales.

	<p>Antena monopolo: es un tipo de antena resonante que radia en todas direcciones, es decir, omnidireccionalmente y con un rango de frecuencias previamente mencionado siendo únicamente señales con una polarización lineal. [16,P.187]</p>
	<p>Polarización: es la especificación geométrica de las oscilaciones. [16,P.187]</p>
	<p>Diagrama de Radiación: es la dependencia angular direccional de la intensidad de las ondas de radio emitidas por antena. [17]</p>

- **Muestreo:** es la reducción de una señal de tiempo continuo a tiempo discreto.
- **Duplexor:** es un dispositivo electrónico que permite la comunicación bidireccional a través de una sola ruta, en radiocomunicaciones se utiliza para emitir y recibir por la misma antena. [\[14\]](#)
- **Anti-Aliasing:** es una técnica para minimizar la distorsión al representar una imagen de alta resolución a la misma en inferior resolución.
- **Teorema de Nyquist-Shannon :** es un teorema fundamental para el muestreo de señales de tiempo continuo a discreto, denotando la siguiente condición: que la frecuencia de muestreo ha de ser mayor al doble de la señal en tiempo continuo.
- **Error de detección digital en el conversor analógico-digital :** es el método utilizado en los actuales *convertidores AD* para evitar posibles fallos al crear la señal digital partiendo de la analógica y causado por posibles distorsiones. [\[20\]](#)

- **Oscilador Local (LO)** : es el dispositivo electrónico utilizado para cambiar la frecuencia de una señal, mejorando el rendimiento de los receptores radio y del sistema de procesamiento de señal.
- **Digitalización**: acción o efecto de registrar datos en formato digital.
- **Diezmado**: Proceso por el cual se obtiene de una señal muestreada discreta, con un [muestreo](#) cada D, siendo D el factor entero de diezmado.
- **Oscilador controlado por voltaje**: dispositivo electrónico cuya frecuencia de oscilación está controlada por una entrada de tensión, es decir que la tensión de entrada determina la frecuencia de oscilación de forma instantánea, usándose para la [modulación](#) de frecuencia o de fase. [\[15,P.497\]](#)
- **Sintonizador**: es el sistema electrónico que recibe transmisiones de radiofrecuencia convirtiendo la frecuencia portadora y su ancho de banda en una frecuencia fija.
- **Propagación Multitrayecto**: es un fenómeno que da lugar a que las señales de radio lleguen a la antena receptora por dos o más trayectos, aunque a veces cause interferencia en el desplazamiento de la fase en la señal.
- **Multiplexación Ortogonal por división de frecuencias (OFDM)**: es el método de codificación de datos digitales en múltiples frecuencias, muy popular en comunicaciones digitales de [banda ancha](#) [\[18\]](#), además de soportar altos niveles de [propagación multitrayecto](#) con una amplia gama de retardos entre señales recibidas. [\[19\]](#)